

名古屋大学工学研究科 総合エネルギー工学専攻
核融合工学講座

核融合プラズマ理工学グループ

藤田隆明(教授)、岡本 敦(准教授)
博士後期課程 1 名、博士前期課程 8 名、学部 3 名 (2023 年度の実績)

研究分野と研究方針

【概要】

核融合エネルギーを実現するためのプラズマ・核融合研究を推進している。環状プラズマ実験装置 TOKASTAR-2、直線磁化プラズマ実験装置 NUMBER を用いた実験研究と、プラズマ統合輸送コード TOTAL、核融合炉システム設計コード PEC を用いた数値計算研究を行っている。2022 年度にはプラズマ内部コイルを用いた新規環状プラズマ実験装置の設計・製作を開始した。

【キーワード】

磁場閉じ込め、トカマク、ヘリカル、電磁流体力学、プラズマ位置安定性、ダイバータ配位、境界層プラズマ、原子分子過程、体積再結合プラズマ、電子エネルギー分布、高エネルギーイオン、電子サイクロトロン加熱、磁場計測、渦電流、プラズマ計測(静電プローブ計測、可視分光計測、粒子計測)、磁気面計測、衝突・輻射モデル、統合輸送コード、システム設計コード、不純物輸送、輸送障壁、中性粒子ビーム電流駆動、原型炉プラズマ性能評価、原型炉設計、核融合中性子源

【主な研究と内容】

(A) トカマク・ヘリカル混成磁場によるプラズマ閉じ込め実験(TOKASTAR-2)

TOKASTAR-2 は、トカマク配位とヘリカル配位及びその両者の混成配位を形成可能なコイル群を有する小型の環状プラズマ実験装置である。プラズマ大半径は約 0.12m、トロイダル磁場強度は約 0.1T である。ヘリカル磁場生成用のコイルは核融合炉への適用が可能な簡単な形状(平行四辺形、扇形及び三角形)の局所コイルである。主目的は、トカマクプラズマへのヘリカル磁場(非軸対称磁場)の印加によるプラズマ位置の安定化に関する研究である。2020 年度までに水平位置(径方向位置)および垂直位置の安定化を実証している。

上記の位置安定化のためにはそれに適した構造を有するヘリカル磁場を印加する必要がある。磁場計算により評価した磁気面の妥当性について、電子銃を用いた電子軌道マッピング計測や静電プローブを用いたプラズマ計測により調べている。また、プラズマの位置安定性や位置形状解析に影響を及ぼす真空容器の渦電流の解析を進めている。

(B) 直線磁化プラズマを用いた基礎実験(NUMBER)

NUMBER は全長約 2 m の直線型磁化プラズマ実験装置であり、核融合プラズマ研究のための多様な基礎実験に用いられる。主たるミッションは(1)核融合炉ダイバータプラズマ中の原子分子過程の理解の高度化、(2) アルファ粒子を模擬する高エネルギーイオンに関する基礎実験および新奇高エネルギーイオン生成法の開発、(3)原型炉開発を見据えたプラズマ診断法の開発である。これらの研究には比較的強磁場(> 0.1 T)環境下の高密度(> 10^{18} m^{-3})プラズマが必要となるため、磁場強度が最適化された高密度プラズマ生成領域と強磁場環境の試験領域を磁力線により接続するという着想の下、本装置は建設された。

上記を踏まえ、電子エネルギー分布の計測と制御、中性ガス圧力分布の制御による体積再結合プラズマ生成、静電的および分光学的手法を用いたプラズマ計測などに現在取り組んでいる。

(C) プラズマ診断法の開発

プラズマの発光強度に基づくプラズマ診断法を開発している。ヘリウム原子からの輝線強度を測定し、衝突輻射モデルを用いて電子温度と電子密度を推定する手法を発展させ空間分布が得られるよう NUMBER 実験との比較に取り組んでいる。衝突輻射過程にイオン衝突が及ぼす影響についてモデルを構築するとともに、外部機関との共同研究により様々な装置での実験データ解析を行っている。高波長分解能の分光器を開発し、ヘリウムイオンのスペクトルのドップラー広がりから高時間分解能でイオン温度を計測している。静電プローブの電流－電圧特性を用いて電子温度と電子密度を計測するときのデータ解析に機械学習の手法を適用し、解析速度と信頼性の両立に取り組んでいる。

(D) 新規環状プラズマ実験装置の設計・製作

2022 年度に、プラズマ内部コイルを用いた新規環状プラズマ実験装置の設計・製作を開始した。ダイバータ配位の環状プラズマを生成し、その境界層におけるプラズマ流や不純物イオンの流速を計測し、その結果をダイバータプラズマシミュレーションコードの結果と比較する。プラズマ流に対するイオンドリフトの効果を明らかにするとともに実験的な裏付けのある不純物輸送モデルを提案することを目的とする。

(E) 原型炉プラズマ性能評価(TOTAL コード)

統合輸送コードは、様々な物理現象をモデル化して統合することによりプラズマの力学的平衡と径方向の熱・粒子の輸送を自己無撞着に解いて予測・解析を行うコードである。我々の研究室ではその一つとして TOTAL コードを開発している。同コードを用いて、核融合原型炉プラズマの性能評価を行い、それに基づいて設計の妥当性を検証するとともにプラズマ制御手法を検討する。そのため、不純物輸送モデルの開発・検証などを行っている。

(F) 核融合炉のシステム設計・経済性評価(PEC コード)

核融合炉の設計においては、技術的な制約の範囲内で、所定の核融合出力および送電端電気出力を得るために必要な炉心プラズマや各機器のパラメータを評価し相互の配置を決定しなければならない。プラズマや機器等を簡単にモデル化して高速にこれを行い、設計パラメータに基づいて建設コスト、発電コストを評価するコードがシステムコードであり、我々の研究室ではその一つとして PEC コードを開発し、トカマク型中性子源やトカマク型原型炉の設計検討を行っている。

2023 年度の研究・教育の概要

【トカマクプラズマに対するヘリカル磁場印加の効果】

縦長断面化のための四重極磁場を生成する目的で使用されていた SC コイルを上下で逆向きに接続することでほぼ一様な水平磁場を生成できるようにし、それによる垂直方向変位への ULT コイル磁場の効果を調べ、ULT コイル磁場の印加により垂直方向変位が低減し、垂直位置不安定性 (VDE) が発生する SC コイル電流値が増加する結果が得られた。SC コイル電流と ULT コイル電流を系統的にスキャンし、VDE が発生する領域の境界を同定した。

【電子軌道マッピング及び静電プローブによるヘリカル閉磁気面の評価】

ヘリカル磁場の実効トロイダル成分を実験的に明らかにするため、15 チャンネル電子収集プローブを用いた真空中での電子軌道計測を行なっている。2023 年度はトロイダル磁場コイルの誤差のため生成される水平磁場を他のコイル (VF コイル) で打ち消すような条件での計測を行い、ULT コイルの実効水平磁場の計測に初めて成功した。ULT コイル電流値の増加とともに、電子軌道がずれる傾向が観測されたが、その変化量は計算より小さく、計算上で ULT コイルが生成する実効水平磁場を過大評価している可能性がある。

【直線磁化プラズマの電子エネルギー分布計測】

電子エネルギー分布関数の磁場に対する非等方性を直接計測するためのレーザートムソン散乱計測システムを開発した。体積ホログラフィック回折格子を用いた迷光除去フィルターを製作し性能評価を行った。

【体積再結合プラズマ生成のための基礎研究】

核融合炉ダイバータにおける熱負荷低減に必須となる体積再結合過程を NUMBER のプラズマに誘起し、体積再結合過程に特徴的な可視スペクトル (再結合スペクトル) の取得に成功した。供給するガス圧力と再結合スペクトル強度の関係を実験により明らかにし、磁力線方向の強度分布がガス圧力により変化することを見出した。中間流領域における中性ガス圧力分布の計算手法を実験により検証し、既存の研究との相違点を整理した。

【マッハプローブを用いたイオン流計測】

空間分布の単一ショット計測が可能な多チャンネルマッハプローブを開発している。先端部の取り付けや真空シール部取り合いの設計を行い、製作を開始した。プローブヘッドの多チャンネル配線に伴う課題を試作により明らかにした。測定回路の設計と部品調達を行った。

【直線磁化プラズマの間欠的な浮遊電位変動と温度変化の計測】

エネルギー分布関数に現れる非平衡性と関連して、間欠的な電位変動現象に伴うイオン温度の変化を調査した。長焦点距離 (850mm) 分光器の調整手法を開発し、電位変動に伴うイオン温度の高波長分解かつ高時間分解計測に着手した。核融合研の HYPER-I 装置を用いた共同研究で妥当なイオン温度計測に成功した。実験装置 NUMBER の磁場配位を活用し電位変動に伴うイオン温度の変化を明らかにする実験に着手した。

【イオン価数分布計測手法の開発】

電子温度と電子密度から線スペクトル発光強度の相対強度が得られる衝突輻射モデルを複数のイオン価数に対して適用できるように拡張し、複数の価数の線スペクトル強度からイオン価数分布を得る計測手法の開発に着手した。ヘリウム原子と 1 価イオンの発光強度に基づく価数別密度比と本手法で得られた価数別密度比を比較した。輻射捕獲、準安定状態の輸送、電子エネルギー分布の非平衡性が本手法に及ぼす影響を明らかにした。アルゴン多価イオンの線スペクトル放射計測を開始した。

【新規環状プラズマ実験装置の設計・製作】

プラズマ内部コイルを用いた新規環状プラズマ実験装置の設計・製作を 2022 年度に開始した。分割可能なトロイダル磁場コイル(56 ターン)の導体の製作を終了した。トロイダル磁場コイルの中心部(円柱状導体)を樹脂含浸により固定するとともに、プラズマ内部コイルを支持する装置中心部(センターポスト)を設計・製作した。磁力線追跡計算によりプラズマ内部コイルの断面形状を決定し、プラズマ内部コイルを製作した。プラズマ内部コイルおよび周辺コイルの支持構造、ダイバータ板を設計した。プラズマ内部コイルのカバーおよびダイバータ板は真空容器から絶縁し、電位を制御できる構造とした。装置の支持ベースとなる底面フランジ(直径 720 mm)を設計し製作した。

【不純物輸送解析】

案内中心の無衝突軌道の計算により評価した不純物イオンの径方向移動速度(ピンチ速度)を用いて JT-60U におけるタングステンの輸送計算を実施し、放射パワーの径方向分布を実験と比較している。2023 年度の解析では、プラズマ中心におけるタングステン密度測定値のトロイダル回転依存性および時間変化に合うように輸送解析のピンチ速度、拡散係数を調整した。また、タングステンからの線放射について OPEN-ADAS の光子放出係数データ(ADF15)を用いて軟 X 線検出器の感度範囲(2.7-20 keV)への放射パワーを評価した。軟 X 線強度の径方向分布の計算値は測定値に近い分布となり、輸送解析で得られた W 密度分布が実際の分布に近いことが確認できた。

【本年度の研究成果発表の概要】

	国内会議発表	国際会議発表	国際会議予稿	学術論文
教員	2	2	2	2
学生	10	2	2	1

本年度の卒業論文・修士論文・博士論文のタイトル

【卒業論文】

- ・ 中性粒子ビームデポジション計算の合理化による統合プラズマ輸送コード TOTAL の高速化
- ・ 磁気面計算に基づく内部コイル型ダイバータ配位プラズマ実験装置のための真空容器内機器の設計
- ・ 直線型プラズマ装置 NUMBER における体積再結合プラズマの磁力線方向分布

【修士論文】

- ・ 統合シミュレーションコードを用いた核融合原型炉プラズマの多変数制御を行う制御ロジックの検討
- ・ 大型トカマク実験装置における放射強度分布計測データに基づく不純物輸送モデルの検証
- ・ TOKASTAR-2 における水平磁場印加時のプラズマ垂直位置に対する局所ヘリカルコイルの効果

【博士論文】

なし

その他・特記事項

【受賞】

- ・ プラズマ・核融合学会 第 40 回年会 若手学会発表賞 (学生部門)
M1 山田 悠斗 「ECR プラズマにおける間欠的な浮遊電位揺動発生時の イオン温度ドップラー分光計測」
- ・ 日本原子力学会 中部支部第 55 回研究発表会 奨励賞
B4 武田 昂大 「直線型プラズマ装置 NUMBER における He 再結合スペクトルのガス圧力依存」